

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 539.1.074.8

EDN OLDYTA

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОСЛАБЛЕНИЯ ПУЧКА ГАММА-КВАНТОВ, НАКЛОННО ПАДАЮЩЕГО НА БАРЬЕР

Е.С. ЕгороваORCID: 0009-0003-8178-941X email: egorova2002@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева
Нижегород, Россия**А.Н. Семенов**ORCID: 0009-0005-8532-4374 email: semenenko7@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева
Нижегород, Россия**В.И. Мельников**ORCID: 0009-0001-2864-0136 email: sgu-1@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева
Нижегород, Россия

Представлены результаты экспериментального исследования и теоретического анализа угловой зависимости ослабления узкого пучка γ -квантов радионуклида Am-241 (тип источника ИГИА-5м) с энергией фотонов 59,54 кэВ. В качестве исследуемых образцов использованы плоские барьеры из следующих материалов: медь, латунь, графит. Актуальность работы обусловлена необходимостью оптимизации массогабаритных характеристик биологической защиты ядерных энергетических установок, в том числе, судового базирования, космического назначения и мобильных медицинских комплексов, где учет геометрии облучения позволяет существенно снизить толщину барьеров без потери эффективности. Эксперименты выполнены на специализированном стенде с коллимированным до 2 мм пучком γ -квантов и сцинтилляционным детектором. Измерения проведены для углов падения γ -квантов от 0° до 60° с шагом 20° . Теоретическое описание выполнено на основе экспоненциального закона ослабления с учетом зависимости эффективной толщины барьера от угла: $d_{\text{эфф}} = \frac{x_0}{\cos \theta}$. Показано, что увеличение угла падения приводит к росту кратности ослабления излучения для всех исследованных материалов, при этом экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретическими расчетами. Результаты подтверждают целесообразность учета углов падения при проектировании биологической защиты и могут быть использованы в учебно-лабораторном практикуме для студентов технических специальностей.

Ключевые слова: биологическая защита; γ -излучение, Am-241 ; угловая зависимость; ослабление; фотоэффект; медь; латунь; графит; коллимация; экспериментальные методы.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Егорова, Е.С. Экспериментальное исследование и теоретический анализ ослабления пучка гамма-квантов, наклонно падающего на барьер / Е.С. Егорова, А.Н. Семенов, В.И. Мельников // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2026. № 3. С. 34-46. EDN: OLDYTA

EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND THEORETICAL ANALYSIS OF ATTENUATION OF A GAMMA-RAY BEAM OBLIQUELY INCIDENT ON A BARRIER

E.S. EgorovaORCID: 0009-0003-8178-941X email: egorova2002@yandex.ruNizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.N. SemenenkoORCID: 0009-0005-8532-4374 email: semenenko7@yandex.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

V.I. MelnikovORCID: 0009-0001-2864-0136 email: sgu-1@yandex.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper presents the results of an experimental investigation and theoretical analysis of the angular dependence of attenuation of a narrow gamma-ray beam from a radionuclide Am-241 (IGIA-5m source type) with a photon energy of 59.54 keV. The test samples were flat barriers made of the following materials: copper, brass, graphite. The relevance of the work is due to the need to optimize the mass and size characteristics of biological protection for nuclear power plants, including ship-based, space-based and mobile medical complexes, where taking into account the irradiation geometry can significantly reduce the barriers thickness without loss of efficiency. The experiments were performed on a specialized test bench with a gamma-ray beam collimated to 2 mm and a scintillation detector. Measurements were carried out for gamma-ray angles of incidence from 0° to 60° in increments of 20°. The theoretical description is based on the exponential attenuation law taking into account the dependence of the effective barrier thickness on the angle: $d_{eff} = \frac{x_0}{\cos \theta}$. It is shown that increasing the angle of incidence leads to an increase in the radiation attenuation coefficient for all the studied materials, while the experimental data are in good agreement with theoretical calculations. The obtained results confirm the feasibility of taking into account the angles of incidence when designing biological protection and can be used in educational and laboratory practice for engineering students.

Key words: biological protection; gamma radiation; Am-241; angular dependence; attenuation; photoelectric effect; copper; brass; graphite; collimation; experimental methods.

FOR CITATION: E.S. Egorova, A.N. Semenenko, V.I. Melnikov. Experimental investigation and theoretical analysis of attenuation of a gamma-ray beam obliquely incident on a barrier. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 3. Pp. 34-46. EDN: OLDYTA

Введение

Биологическая защита ядерных энергетических установок является одним из ключевых элементов обеспечения радиационной безопасности персонала и окружающей среды. Традиционные подходы к проектированию защиты основываются на выборе материала и его толщины, обеспечивающих требуемую кратность ослабления излучения при нормальном падении пучка [1, 2]. Однако в реальных условиях эксплуатации источники ионизирующего излучения могут располагаться под различными углами относительно защитных барьеров, а сами барьеры имеют сложную геометрическую форму. Вопрос о влиянии угла падения излучения низкоэнергетического источника на эффективность ослабления исследован недостаточно полно. Большинство справочных данных приводят значения линейных и массовых коэффициентов ослабления только для геометрии узкого пучка при нормальном падении [3, 4]. Вместе с тем, при косом падении эффективная толщина барьера увеличивается, что позволяет уменьшить массогабаритные характеристики защиты – фактор, особенно важный для судовых ядерных установок [5].

Цель настоящей работы – экспериментальное определение зависимости ослабления узкого пучка γ -излучения низкой энергии от угла падения на плоский барьер из различных материалов (медь, латунь, графит) и сравнение полученных данных с теоретической моделью.

Теоретические основы

При прохождении через вещество узкий моноэнергетический пучок γ -излучения ослабляется по экспоненциальному закону [6]:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (1)$$

где:

I_H – начальная интенсивность падающего на барьер пучка γ -квантов, $\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$;

I – интенсивность пучка γ -квантов после прохождения поглощающего слоя толщиной x , $\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$;

μ – линейный коэффициент ослабления, см^{-1} ;

x – толщина барьера, см.

Линейный коэффициент ослабления связан с массовым коэффициентом μ_m соотношением:

$$\mu = \mu_m \cdot \rho \quad (2)$$

где:

μ – линейный коэффициент ослабления, см^{-1} ;

μ_m – массовый коэффициент ослабления, $\frac{\text{см}^2}{\text{г}}$;

ρ – плотность материала, $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

При косом падении пучка под углом θ к нормали эффективная толщина барьера возрастает:

$$x_{\text{эфф}} = \frac{x_0}{\cos \theta} \quad (3)$$

где:

$x_{\text{эфф}}$ – эффективная толщина барьера, см;

x_0 – физическая толщина барьера, см;

θ – угол падения излучения относительно нормали, °.

Соответственно, теоретическая зависимость интенсивности пучка γ -квантов от угла падения описывается выражением:

$$I(\theta) = I_H \cdot e^{\frac{-\mu \cdot x_0}{\cos \theta}} \quad (4)$$

где:

I_H – начальная интенсивность падающего на барьер пучка γ -квантов, $\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$;

$I(\theta)$ – зависимость интенсивности от угла падения, $\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$;

μ – линейный коэффициент ослабления, см^{-1} ;

x_0 – физическая толщина барьера, см;

θ – угол падения пучка γ -квантов относительно нормали, °.

Для энергии γ -квантов Am-241 (59,54 кэВ) доминирующим процессом взаимодействия является фотоэлектрическое поглощение, сечение которого пропорционально Z^5 , однако это справедливо лишь для материалов с высоким атомным номером. В случае меди ($Z = 29$) и латуни ($Z \sim 30$) оно еще заметно, в графите ($Z = 6$) этот процесс пренебрежимо мал, и главную роль играет комптоновское рассеяние. На основе данных NIST [7] были рассчитаны линейные коэффициенты ослабления для исследуемых материалов, указанные в табл. 1.

В качестве источника ионизирующего излучения использовался Am-241. Несмотря на то, что он является α -излучателем, его выбор для изучения взаимодействия γ -квантов с веществом физически обоснован и широко распространен в исследовательской практике. Кажущееся противоречие снимается при рассмотрении схемы распада изотопа Am-241. Он претерпевает α -распад с периодом полураспада 432,6 г., превращаясь в изотоп Np-237 [9]. Однако α -распад происходит не напрямую в основное состояние дочернего ядра, а преимущественно (более чем в 99 % случаев) на его возбужденные уровни [7]. Возбужденное ядро Np-237, находясь на высокоэнергетичном уровне, практически мгновенно (за время $\sim 10^{-12}$ с) переходит в основное состояние, испуская избыток энергии в виде γ -квантов. Именно этот процесс является источником γ -излучения источника на основе Am-241. Ключевой для большинства применений является γ -линия с энергией 59,54 кэВ, которая возникает при переходе дочернего ядра Np-237 из первого возбужденного состояния в основное [9].

Таблица 1.
Линейные коэффициенты ослабления для исследуемых материалов

Table 1.
Linear attenuation coefficients for the studied materials

Материал	Плотность (ρ), $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	Массовый коэффициент ослабления (μ_m), $\frac{\text{см}^2}{\text{г}}$	Линейный коэффициент ослабления (μ), см^{-1}
Медь	8,920	1,593	14,210
Графит	2,260	0,175	0,396
Латунь*	8,750	1,596	13,970

На рис.1 изображена схема распада Am-241.

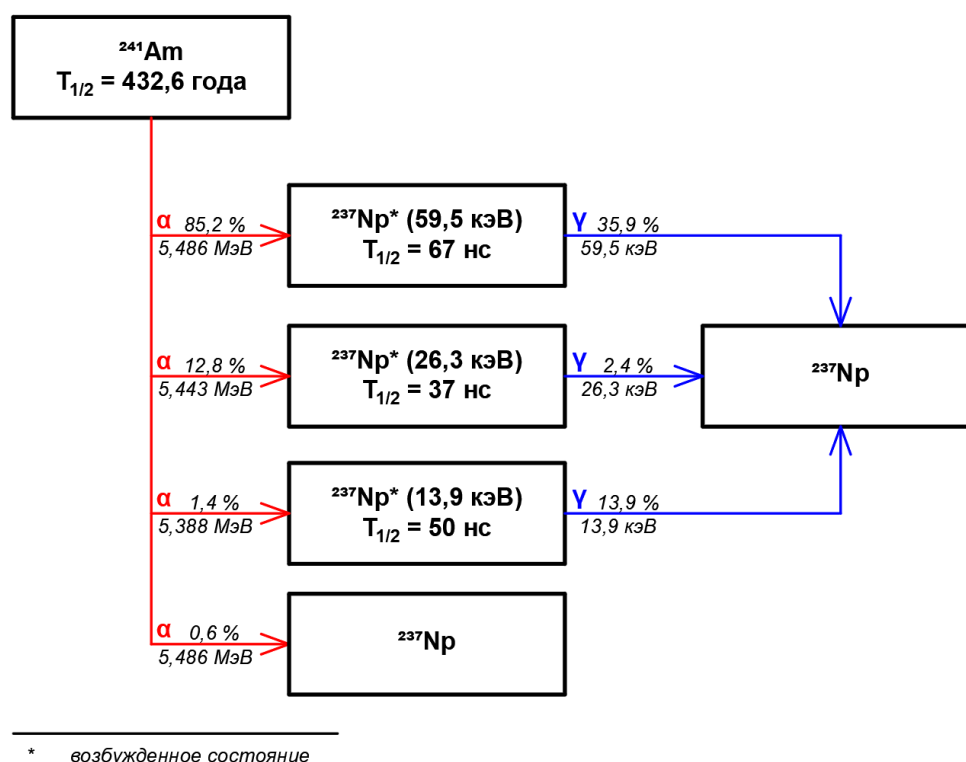


Рис. 1. Распад Am-241

Fig. 1. Am-241 decay

Таким образом, источник Am-241 является не «чистым» α -излучателем, а комбинированным α - и γ -излучателем, где γ -кванты являются вторичным продуктом α -распада. Для экспериментальных работ по изучению ослабления γ -излучения важна монохроматичность источника. Пик 59,54 кэВ является узким, четким и доминирующим в γ -спектре Am-241. Хотя существуют и другие, более слабые γ -переходы (например, 26,4 кэВ), их интенсивность на порядки ниже, и они не влияют на результаты измерений в пике полного поглощения 59,54 кэВ [9]. Выбор Am-241 обусловлен двумя факторами. Во-первых, энергия достаточно велика, чтобы проникать через образцы (барьеры) толщиной от десятых долей миллиметра до единиц сантиметров в зависимости от материала, что удобно для лабораторных исследований [10]. Во-вторых, для биологической защиты от излучения Am-241 не требуется массивное экранирование, что упрощает конструкцию экспериментальной установки [10].

*Для латуни принят усредненный состав: Cu – 90 %, Zn – 10 % [8].

Для того изучения именно γ -излучения, нужно исключить попадание α -частиц в детектор. Исполнение источника на основе Am241, а также конструкция экспериментальной установки полностью исключают попадание α -частиц в чувствительный объем детектора.

Методика эксперимента

Исследования проводились на специализированном стенде, схема которого представлена на рис. 2 (вид сверху).

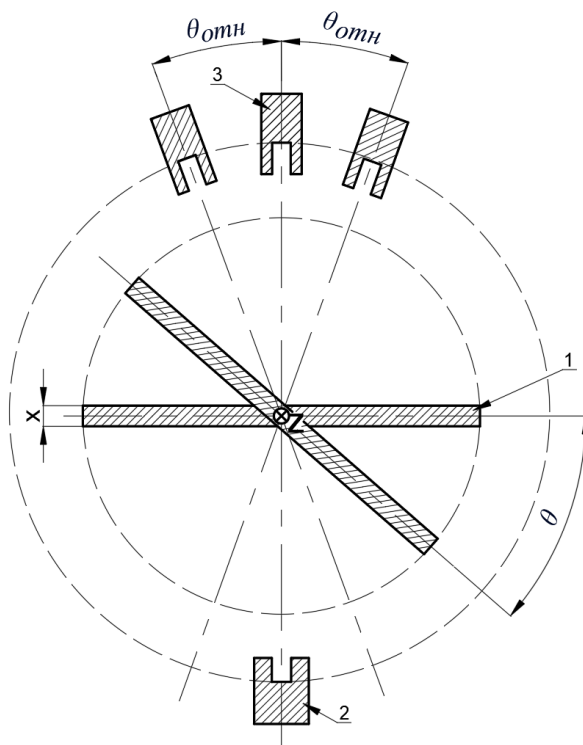


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 – защитный барьер; 2 – контейнер с источником; 3 – детектор

Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup:

1 – protective barrier; 2 – container with source; 3 – detector

В ходе эксперимента контейнер с источником (2) оставался неподвижным. Защитный барьер (1) и детектор (3) вращались вокруг оси Z. Ось Z перпендикулярна плоскости основания установки и направлена на наблюдателя. Угол поворота барьера относительно источника θ изменялся в диапазоне от 0° до 60° с шагом 20° . При фиксации каждого значения угла поворота барьера θ детектор перемещался относительно оси «источник – детектор» на относительный угол $\theta_{отн}$ в диапазоне от -6° до $+6^\circ$ с шагом 1° . Отрицательные значения соответствуют повороту детектора против часовой стрелки относительно указанной оси, положительные – по часовой стрелке. Коллиматоры диаметром 2 мм использовались как для источника, так и для детектора. Расстояние от барьера до источника составляло 60 мм, а до детектора – 70 мм. Регистрация γ -квантов осуществлялась с помощью блока детектирования БДЕГ-25(25)Н со сцинтилляционным детектором на основе кристалла NaI(Tl) и вакуумным фотоумножителем R3998. Малая площадь чувствительной области за счет применения дополнительного коллиматора ($\varnothing$ 2 мм) обеспечила регистрацию только центральной части коллимированного пучка, что минимизировало вклад рассеянного излучения. Измерения проводились с помощью спектрометрического комплекса модели СКС-07П-Г42, в частности в программе eSBS [11]. Интенсивность излучения рассчитывалась по формуле:

$$I = \frac{\bar{N}}{t} - I_{\text{фон}} \quad (5)$$

где:

I – интенсивность падающего на барьер пучка γ -квантов за вычетом фона, $\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$;

N – скорость счета за время измерения t , имп;

t – время измерения, с;

$I_{\text{фон}}$ – интенсивность фонового излучения, $\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$.

В данной работе предполагается прямая пропорциональность скорости счета импульсов и интенсивности пучка γ -квантов, так как опыт проводился в условиях низких скоростей счета, где влиянием мертвого времени детектирующей системы можно пренебречь. Статистическая погрешность измерений определялась на основе распределения Пуассона:

$$\sigma_{I(t)} = \sqrt{N} \quad (6)$$

$$\sigma_I = \frac{\sqrt{N}}{t} \quad (7)$$

Результаты

Основные результаты измерений следующие. Интенсивность прямого пучка γ -квантов источника Am-241 при коллимации составила $I_n = 84,380 \pm 1,315 \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$, что значительно превышает уровень фона $I_{\text{фон}} = 0,363 \pm 0,038 \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$. На рис. 3 представлена зависимость интенсивности $I(\theta)$ от относительного угла поворота детектора $\theta_{\text{отн}}$ в отсутствие барьера. На рис. 4-6 показаны зависимости интенсивности $I(\theta)$ от угла поворота барьера θ при различных фиксированных значениях $\theta_{\text{отн}}$. Все данные приведены за вычетом фона. Статистическая погрешность оценена как выборочное среднеквадратичное отклонение по трем повторениям. Измерение интенсивности пучка γ -квантов с коллиматором показало, что Am-241 дает достаточную для регистрации интенсивность. Интенсивность при прямом падении пучка γ -квантов без барьера: $I_n = 84,380 \pm 1,315 \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$.

С помощью полученных данных были построены графики зависимости интенсивности I_θ от относительного поворота $\theta_{\text{отн}}$ детектора без барьера (рис. 3), а также графики зависимости интенсивности $I(\theta)$ от угла поворота барьера из различных материалов θ и относительного поворота $\theta_{\text{отн}}$ детектора (рис. 4-6). Все значения приведены с учетом фона и статистической погрешности. Статистическая погрешность измерений рассчитана как выборочное среднеквадратическое отклонение (СКО) в серии из трех повторений.

На основе линейных коэффициентов ослабления μ , определенных по базе данных NIST [7] для энергии $E = 59,54$ кэВ (табл. 1), и экспериментально измеренной интенсивности падающего коллимированного пучка γ -квантов $I_n = 84,380 \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$ были рассчитаны теоретические зависимости интенсивности $I(\theta)$ по формуле (4). Приведенные данные демонстрируют, что интенсивность $I(\theta)$ для всех трех материалов монотонно убывает с ростом угла поворота θ , что обусловлено увеличением эффективной толщины барьера (3).

На рис. 7-9 представлены совмещенные графики, на которые вынесены как экспериментальные точки, так и теоретические, рассчитанные по формуле (4). Такое представление позволяет наглядно оценить степень соответствия теории и эксперимента для каждого материала.

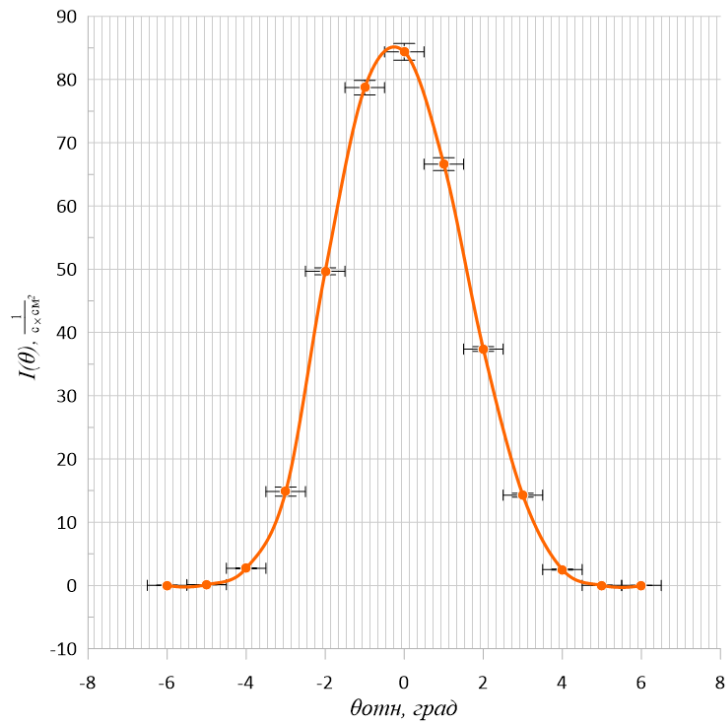


Рис. 3. Экспериментальная зависимость интенсивности без барьера I_0 от относительного угла поворота детектора $\theta_{отн}$

Fig. 3. Experimental dependence of the unshielded intensity I_0 on the detector relative rotation angle $\theta_{отн}$

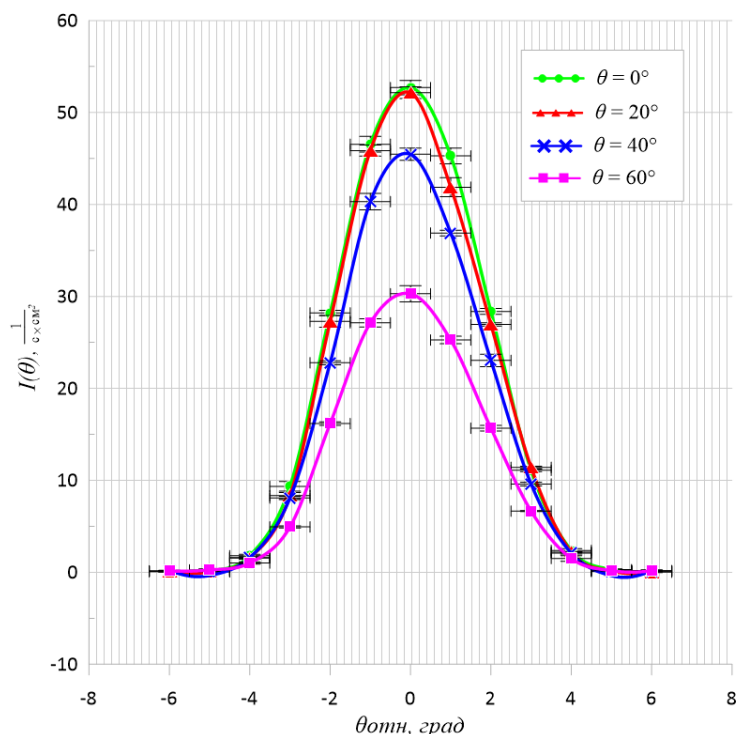


Рис. 4. Экспериментальная зависимость интенсивности $I(\theta)$ от угла падения θ для меди (0,4 мм)

Fig. 4. Experimental dependence of intensity $I(\theta)$ on the angle of incidence θ for copper (0.4 mm)

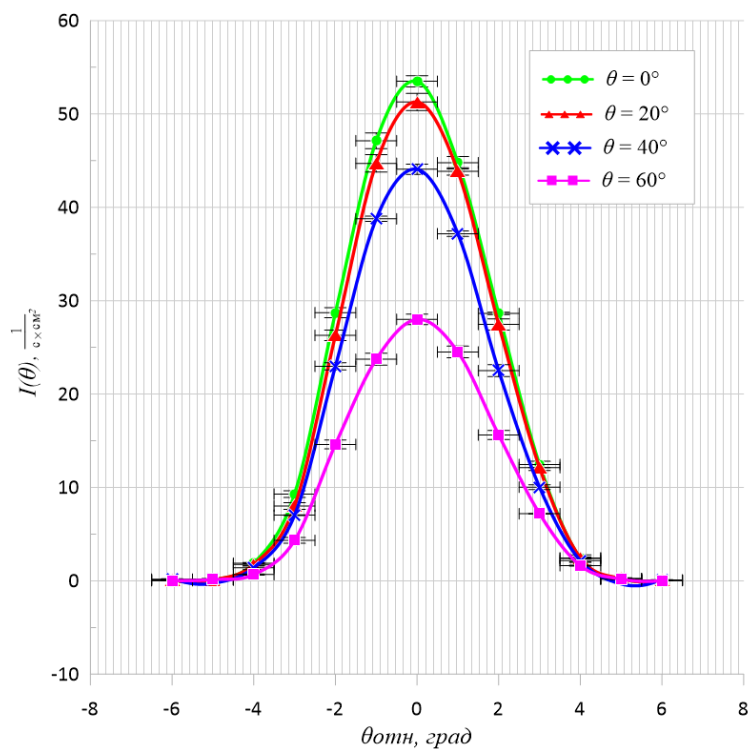


Рис. 5. Экспериментальная зависимость интенсивности $I(\theta)$ от угла падения θ для графита (20 мм)

Fig. 5. Experimental dependence of intensity $I(\theta)$ on the angle of incidence θ for graphite (20 mm)

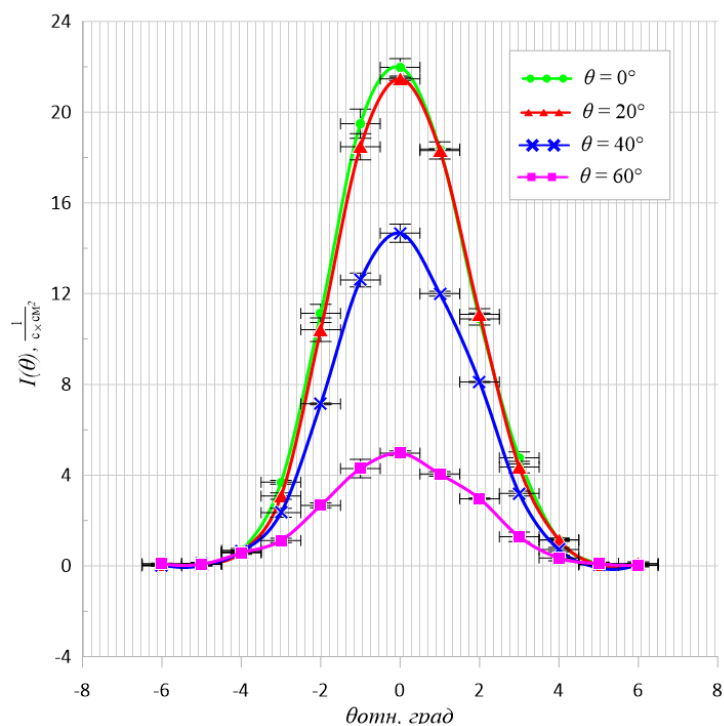


Рис. 6. Экспериментальная зависимость интенсивности $I(\theta)$ от угла падения θ барьера из латуни (1 мм)

Fig. 6. Experimental dependence of intensity $I(\theta)$ on the angle of incidence θ for brass (1 mm)

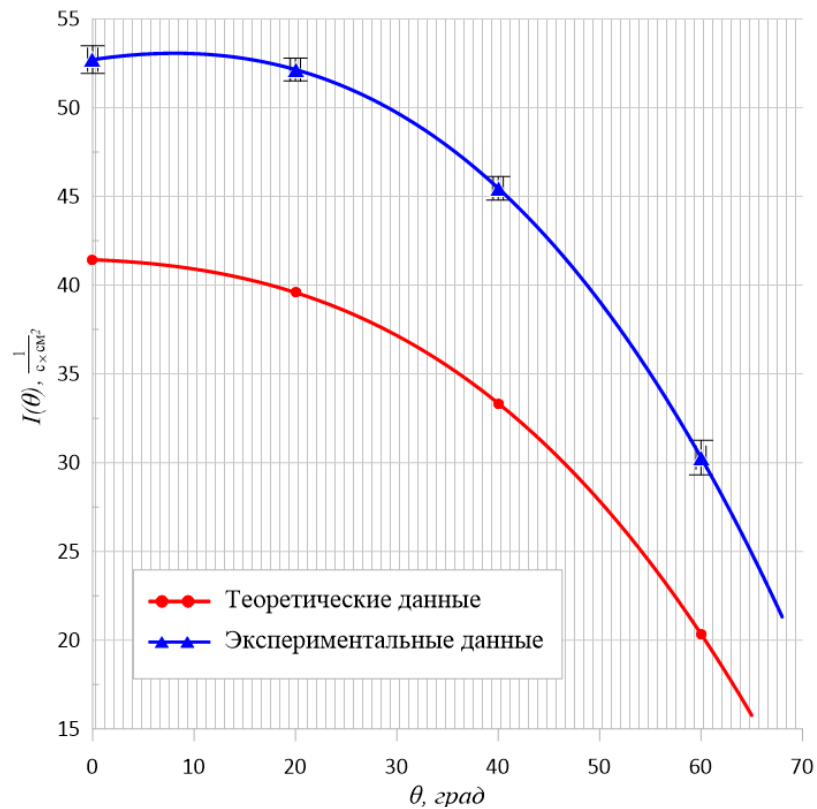


Рис. 7. Зависимость интенсивности от угла падения для барьера из меди (0,4 мм): экспериментальная и теоретическая кривая

Fig. 7. Dependence of intensity on the angle of incidence for a copper barrier (0,4 mm): experimental and theoretical curves

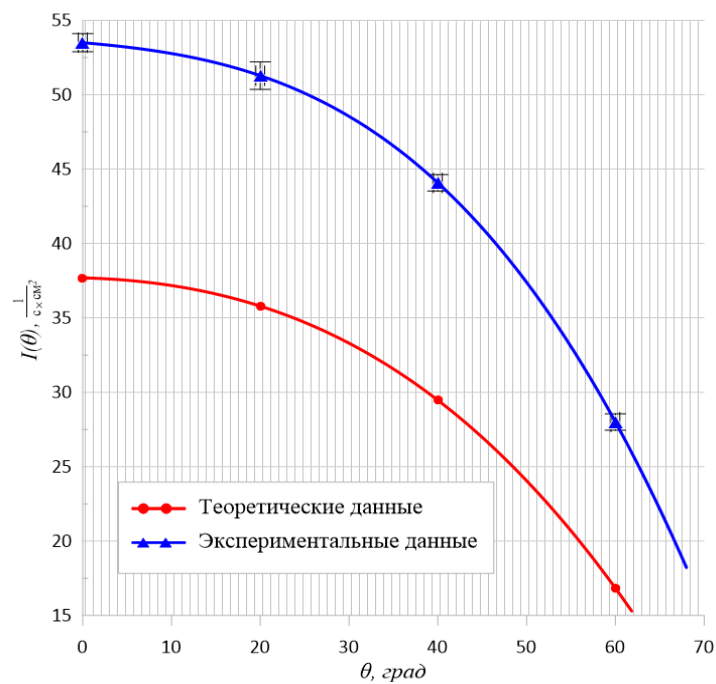


Рис. 8. Зависимость интенсивности от угла падения для барьера из графита (20 мм): экспериментальная и теоретическая кривая

Fig. 8. Dependence of intensity on the angle of incidence for a for graphite barrier (20 mm): experimental and theoretical curves

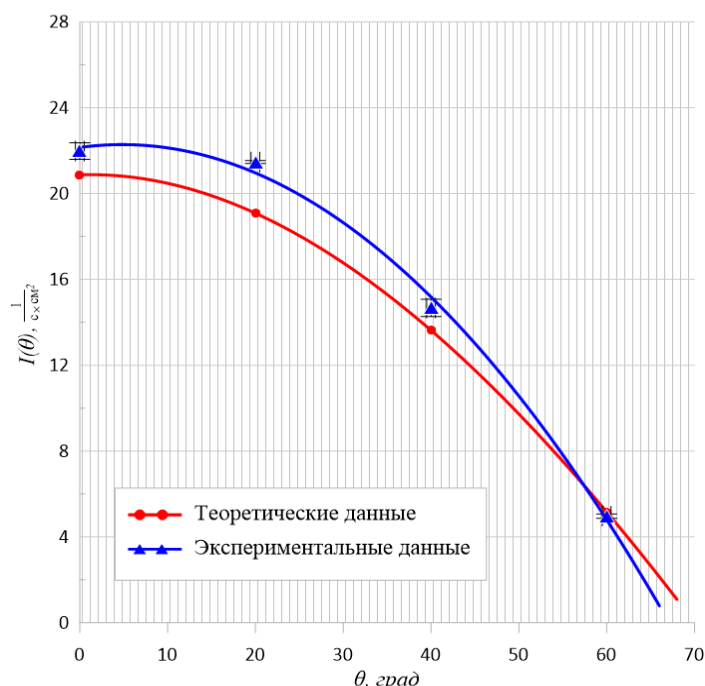


Рис. 9. Зависимость интенсивности от угла падения для барьера из латуни (1 мм): экспериментальная и теоретическая кривая

Fig. 9. Dependence of intensity on the angle of incidence for a for brass barrier (1 mm): experimental and theoretical curves

Для количественного сравнения ослабляющей способности материалов при нормальном падении ($\theta = 0^\circ$) рассчитаны кратность ослабления K по формуле (8) и линейные коэффициенты ослабления по формуле (9).

$$K = \frac{I_H}{I} \quad (8)$$

где: I_H – начальная интенсивность падающего на барьер пучка γ -квантов, $\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$; I – интенсивность пучка γ -квантов, $\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$; K – коэффициент ослабления.

$$\mu = \frac{1}{x} \cdot \ln \left(\frac{I_H}{I} \right) \quad (9)$$

где: x – толщина барьера; I_H – начальная интенсивность падающего на барьер пучка γ -квантов, $\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$; I – интенсивность после прохождения слоя x , $\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$; $\ln$ – натуральный логарифм.

В табл. 2 записаны результаты вычислений линейных коэффициентов ослабления.

Таблица 2.
Сравнительная эффективность материалов

Table 2.
Comparative efficiency of the materials

	Материал		
	Медь	Графит	Латунь
$\mu_{\text{эксп}}, \text{см}^{-1}$	$11,767 \pm 0,034$	$0,228 \pm 0,030$	$13,453 \pm 0,090$
$\mu_{\text{теор}}, \text{см}^{-1}$	14,210	0,396	13,970

Обсуждение полученных результатов

Как следует из данных табл. 2, экспериментальные значения линейного коэффициента ослабления $\mu_{\text{эксп}}$ для меди ($9,413 \text{ см}^{-1}$) систематически ниже теоретического $\mu_{\text{теор}}$ ($14,210 \text{ см}^{-1}$). Для латуни наблюдается некоторое незначительное расхождение ($\mu_{\text{эксп}} = 13,453 \text{ см}^{-1}$,

$\mu_{теор} = 13,970 \text{ см}^{-1}$), для графита экспериментальное значение $\mu_{эксп}$ ($0,228 \text{ см}^{-1}$) также ниже теоретического ($0,396 \text{ см}^{-1}$), однако характер расхождения иной. Такое различие требует дополнительного анализа, который был выполнен на основе угловых зависимостей интенсивности (рис. 3-9) с акцентом на положение пика и его изменение с ростом угла падения барьера θ . Для медного барьера при нормальном падении пучка γ -квантов ($\theta = 0^\circ$) максимальная интенсивность $I_\theta = 52,703 \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$. При этом экспериментальные значения систематически превышают теоретические. Такое поведение указывает на малоугловое рассеяние: рассеянные фотоны сохраняют направление, близкое к исходному, и попадают в детектор. Геометрия эксперимента (коллимация 2 мм) обеспечивает попадание в детектор фотонов, рассеянных на угол менее 1° . При энергии 59,54 кэВ потеря энергии при комптоновском рассеянии на такой угол составляет менее 0,01 кэВ, что не разрешается сцинтилляционным детектором (NaI(Tl)). Малая толщина медного образца (0,4 мм) не позволяет поглотить рассеянную компоненту, поэтому рассеянные фотоны регистрируются как «прошедшие», что и приводит к занижению $\mu_{эксп}$. Этого достаточно, чтобы снизить измеренное значение с 14,210 до $9,413 \text{ см}^{-1}$.

Для графитового барьера (рис. 8) при нормальном падении максимальная интенсивность I_0 составляет $53,493 \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$, что отличается от теоретической I_0 ($38,219 \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$). С ростом угла падения до 60° максимум снижается до $28,000 \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$. При этом во всех случаях сохраняется четко выраженный пик. Различие между экспериментом и теорией объясняется следующим. При малом атомном номере графита ($Z = 6$) и большой толщине (20 мм) часть фотонов испытывает однократное или двукратное комптоновское рассеяние и сохраняет направление, достаточное для попадания в детектор. Простая экспоненциальная модель не учитывает этот вклад. Однако, в отличие от меди, рассеянная компонента в графите не приводит к значительному занижению $\mu_{эксп}$, поскольку табличное значение $\mu_{теор}$ для графита само по себе мало. Наиболее интересное поведение демонстрирует латунь (рис. 9). При $\theta = 0^\circ$ максимум ($21,977 \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$) находится при $\theta_{отн} = 0^\circ$. Однако при $\theta = 20^\circ$, 40° и 60° наблюдается четкое смещение пика от нулевого угла поворота детектора. Это смещение пика является прямым экспериментальным доказательством преобладания рассеяния над чисто направленным прохождением. При косом падении на латунь (1 мм) основная часть фотонов, достигших детектора, – это не первичные кванты, а однократно рассеянные, изменившие направление. Оптимальная толщина латуни (1 мм) достаточна для того, чтобы поглотить часть рассеянной компоненты, но не настолько велика, чтобы подавить эффект полностью – поэтому $\mu_{эксп}$ и $\mu_{теор}$ согласуются, но угловое распределение смещается.

Таким образом, занижение $\mu_{эксп}$ для меди обусловлено сочетанием трех факторов: 1) достаточно высокое сечение рассеяния вперед (когерентного и комптоновского) при 59,54 кэВ; 2) малая толщина барьера, при которой рассеянные фотоны не успевают поглотиться; 3) геометрия коллимации, пропускающая рассеяние на углы $<1^\circ$ в детектор. Для латуни и графита эти факторы либо ослаблены за счет большой толщины, либо скомпенсированы.

Выводы

1. Экспериментально установлено, что для всех исследованных материалов увеличение угла падения γ -излучения от 0 до 60° приводит к монотонному уменьшению интенсивности за барьером, что качественно соответствует теоретической модели, основанной на увеличении эффективной толщины барьера при косом падении.

2. Экспериментальное значение линейного коэффициента ослабления для барьера из меди толщиной 0,4 мм оказалось существенно ниже теоретического. Анализ угловых зависимостей показал систематическое превышение экспериментальной интенсивности над теоретической при всех углах падения. Предположительно причиной является малоугловое рассеяние (когерентное и комптоновское): рассеянные фотоны попадают в детектор благодаря

геометрии коллимации и регистрируются как прошедшие. Малая толщина барьера не позволяет поглотить рассеянную компоненту.

3. Для графита экспериментальная максимальная интенсивность выше теоретического значения. Расхождение между теорией и экспериментом объясняется вкладом однократного и двукратного комптоновского рассеяния вперед, не учтенного в простой экспоненциальной модели. Однако, в отличие от меди, это расхождение не приводит к значительному занижению $\mu_{\text{эксп}}$.

4. Для латуни экспериментальные и теоретические значения интенсивности согласуются при всех углах падения с незначительным отклонением. Ключевая особенность – при увеличении угла падения θ наблюдается отчетливое смещение пика углового распределения от $\theta_{\text{отн}} = 0^\circ$. Это является прямым доказательством того, что при косом падении основной вклад вносят однократно рассеянные фотоны, изменившие направление движения. Толщина 1 мм является достаточной для поглощения рассеянной компоненты, поэтому $\mu_{\text{эксп}}$ хорошо согласуется с $\mu_{\text{теор}}$.

5. Занижение $\mu_{\text{эксп}}$ для меди не является следствием инструментальных ошибок (для латуни и графита в идентичных условиях расхождение либо практически отсутствует, либо имеет иную природу). Оно обусловлено специфическим сочетанием трех факторов: достаточно высокое сечение рассеяния, малая толщина образца и геометрия коллимации, пропускающая рассеяние на углы $<1^\circ$ в детектор. Смещение пика на угловых зависимостях является надежным диагностическим признаком режима рассеяния.

6. При проектировании радиационной защиты от источников γ -излучения в диапазоне энергий 50-60 кэВ необходимо учитывать:

- для тонких образцов (менее 1 мм для материалов со средним Z) табличные коэффициенты ослабления для материалов со средним Z при малых толщинах могут занижаться из-за малоуглового рассеяния;
- для материалов с малым Z (графит, вода, бетон) и большой толщиной экспериментальное пропускание может систематически превышать расчетное, полученное по экспоненциальной модели. Это связано с тем, что модель не учитывает вклад однократно рассеянных вперед фотонов, регистрируемых детектором;
- оптимальная толщина (как в случае латуни 1 мм) обеспечивает согласие с табличными данными и сохраняет направленность пучка.

7. Полученные результаты демонстрируют, что экспоненциальная модель дает адекватное качественное описание угловой зависимости ослабления, однако для количественного согласия с экспериментом в тонких образцах со средним Z требуется учет малоуглового рассеяния, а в толстых образцах малого Z – учет однократного рассеяния вперед. Строгий учет этих эффектов возможен методами Монте-Карло. В рамках данной работы такое моделирование не проводилось, однако сам факт выявления и количественной оценки расхождений имеет самостоятельную методическую ценность. Данные могут быть использованы в учебно-лабораторном практикуме для студентов технических специальностей при изучении взаимодействия ионизирующего излучения с веществом.

Библиографический список

1. **Машкович, В.П.** Защита от ионизирующих излучений: Справочник / В.П. Машкович, А.В. Кудрявцева. – М.: Энергоатомиздат, 2013. – 464 с.
2. **Иванов, В.И.** Основы радиационной безопасности атомных станций / В.И. Иванов, В.П. Машкович, Э.М. Центрер. – М.: Энергоатомиздат, 2012. – 328 с.
3. **Hubbell, J.H.** Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients 1 keV to 20 MeV for Elements $Z = 1$ to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest / J.H. Hubbell, S.M. Seltzer. – NISTIR 5632, 1995. – 118 p.
4. **Абрамов, А.И.** Основы экспериментальных методов ядерной физики / А.И. Абрамов, Ю.А. Казанский, Е.С. Матусевич. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 544 с.

5. **Климов, А.Н.** Ядерная физика и ядерные реакторы / А.Н. Климов. – М.: Энергоатомиздат, 2011. – 480 с.
6. **Гусев, Н.Г.** Защита от ионизирующих излучений: Том 1. Физические основы защиты / Н.Г. Гусев, В.А. Климанов, В.П. Машкович [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 512 с.
7. X-Ray Mass Attenuation Coefficients. NIST Standard Reference Database 126. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients> (дата обращения: 10.02.2026).
8. **Батоев, В.А.** Радиационная защита: теория и практика / В.А. Батоев, С.В. Батоева. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – 212 с.
9. **Kocher, D.C.** Radioactive Decay Data Tables: A Handbook of Decay Data for Application to Radiation Dosimetry and Radiological Assessments / D.C. Kocher. – Oak Ridge: Technical Information Center, U.S. Department of Energy, 1981. – 224 p. – (DOE/TIC-11026).
10. **Knoll, G.F.** Radiation Detection and Measurement / G.F. Knoll. – 4th ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2010. – 860 p.
11. ВНИИА. Обзор отечественных радиометрических и спектрометрических систем, которые могут быть использованы для целей учета и контроля ядерных материалов [Электронный ресурс]. URL: <https://vniia.ru/rgamo/literat/obzor/index.html> (дата обращения 19.02.2026)

References

1. Mashkovich V.P., Kudryavtseva A.V. Zashchita ot ioniziruyushchikh izlucheniy : Spravochnik [Protection against ionizing radiation : Handbook]. Moscow: Energoatomizdat; 2013. 464 p. (in Russian).
2. Ivanov V.I., Mashkovich V.P., Tsenter E.M. Osnovy radiatsionnoy bezopasnosti atomnykh stantsiy [Fundamentals of radiation safety of nuclear power plants]. Moscow: Energoatomizdat; 2012. 328 p. (in Russian).
3. Hubbell J.H., Seltzer S.M. Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest. NISTIR 5632; 1995. 118 p.
4. Abramov A.I., Kazanskiy Yu.A., Matusevich E.S. Osnovy eksperimental'nykh metodov yadernoy fiziki [Fundamentals of experimental methods of nuclear physics]. Moscow: Energoatomizdat; 2010. 544 p. (in Russian).
5. Klimov A.N. Yadernaya fizika i yadernye reaktory [Nuclear physics and nuclear reactors]. Moscow: Energoatomizdat; 2011. 480 p. (in Russian).
6. Gusev N.G., Klimanov V.A., Mashkovich V.P., et al. Zashchita ot ioniziruyushchikh izlucheniy : Tom 1. Fizicheskie osnovy zashchity [Protection against ionizing radiation : Vol. 1. Physical foundations of protection]. Moscow: Energoatomizdat; 1989. 512 p. (in Russian).
7. Batoev V.A., Batoeva S.V. Radiatsionnaya zashchita: teoriya i praktika [Radiation protection: theory and practice]. Saint Petersburg: Izd-vo Politekh. un-ta; 2018. 212 p. (in Russian).
8. Kocher D.C. Radioactive Decay Data Tables: A Handbook of Decay Data for Application to Radiation Dosimetry and Radiological Assessments. Oak Ridge: Technical Information Center, U.S. Department of Energy; 1981. 224 p. (DOE/TIC-11026).
9. Knoll G.F. Radiation Detection and Measurement. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons; 2010. 860 p.
10. X-Ray Mass Attenuation Coefficients. NIST Standard Reference Database 126. Available from: <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients> [accessed 2026 Feb 10].
11. VNIIA. Obzor otechestvennykh radiometricheskikh i spektrometricheskikh sistem, kotorye mogut byt' ispol'zovany dlya tseley ucheta i kontrolya yadernykh materialov [Review of domestic radiometric and spectrometric systems that can be used for nuclear material accounting and control]. Available from: <https://vniia.ru/rgamo/literat/obzor/index.html> [accessed 2026 Feb 19]. (in Russian).

**Дата поступления
в редакцию: 10.05.2026**

**Дата принятия
к публикации: 01.07.2026**